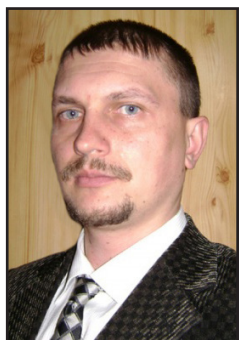




Измерение деформаций балочных пролётных строений мостов



Иван БОНДАРЬ

Ivan S. BONDAR

Measurement of Deformations of Beam Spans of Bridges

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 45)

Показана необходимость применения мобильных измерительно-вычислительных комплексов при проведении диагностики мостов, а также дан анализ результатов измерений изгибных деформаций и собственных частот колебаний балочного строения железнодорожного моста при движении поезда. На материалах исследований, проведённых в Республике Казахстан.

Ключевые слова: мост, пролётное строение, деформация, диагностика, мониторинг.

Бондарь Иван Сергеевич – старший преподаватель Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева (КазАТК), Алматы, Казахстан.

Искусственные сооружения транспортной отрасли по прочности, надежности, устойчивости, экономичности обслуживания и срокам эксплуатации должны удовлетворять действующим техническим требованиям и обеспечивать пропуск существующих и перспективных нагрузок с установленными скоростями движения.

Многочисленные случаи деформирования искусственных сооружений при повышении осевых нагрузок и скоростей движения ставят задачу своевременного выявления природы и причин возникновения дефектов в элементах конструкции. Это обусловлено тем, что разрушения и аварии, происходящие из-за деформационных процессов, наносят огромный экономический, социальный и экологический ущерб, несопоставимый со средствами, затрачиваемыми на защитные мероприятия.

Условия пропуска поездных нагрузок по мостам устанавливают сравнением классов элементов пролетных строений, указанных в руководствах по определению грузоподъемности мостов [1–3], с классами пропускаемого подвижного состава, приведенными в [4]. Пролетные строения при определении их грузоподъемности испы-

тывают в соответствии со СНиП [5], если нужно уточнить действительное напряженное состояние элементов, а также при наличии дефектов и повреждений, влияние которых на грузоподъемность трудно учесть теоретически.

В 2013 году в Казахской академии транспорта и коммуникаций создана научно-исследовательская лаборатория «Испытания пути и искусственных сооружений (ИПиИС)». Необходимость ее создания вызвана острой потребностью структурных подразделений АО «НК «КТЖ», ответственных за содержание инфраструктуры.

Через два года лаборатория аккредитована в системе аккредитации Республики Казахстан на соответствие требованиям СТ РК ИСО/МЭК 17025–2007 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий» (аттестат № KZ.И.02.1656 от 27.10.2015).

В настоящее время лаборатория оснащена современными приборами и оборудованием. Основными направлениями деятельности для нее являются:

- обследование и испытание мостовых сооружений, водопропускных труб и других искусственных сооружений на железных и автомобильных дорогах, с оценкой технического состояния и определением условий пропуска подвижной нагрузки, разработкой рекомендаций по устранению неисправностей и продлению срока безопасной эксплуатации сооружения;

- подготовка, специализация и стажировка специалистов-мостовиков;

- полевые и лабораторные исследования грунтов оснований фундаментов существующих и проектируемых зданий и сооружений;

- совершенствование и внедрение прецизионных (высокоточных) методов измерений деформаций и вибраций;

- осуществление контроля качества строительства и реконструкции искусственных сооружений и земляного полотна;

- вибродиагностика и мониторинг железнодорожного пути и искусственных сооружений на транспорте.

Имеющееся оборудование обеспечивает высокую степень отказоустойчивости и помехозащищенности используемых средств измерений и линий связи, возможность расширения конфигурации подклю-

чаемых измерительных устройств (датчиков), их применения в системе мониторинга, автоматическое распознавание и диагностику объектов.

При помощи лабораторного оборудования можно производить:

- измерение напряжений и относительных деформаций в элементах пролетных строений мостов при воздействии подвижного состава одновременно в 16 сечениях при длине измерительного тракта до 500 м;

- измерение динамических характеристик мостов при воздействии подвижного состава одновременно в 8 сечениях при длине измерительного тракта до 250 м;

- построение графиков прогибов и определение максимальных динамических коэффициентов пролетных строений мостов при воздействии подвижного состава;

- определение периодов (частот) собственных (свободных) колебаний пролетных строений мостов;

- определение амплитудно-частотных характеристик пролетных строений мостов в вертикальном, горизонтально-поперечном и горизонтально-продольном направлениях;

- оценку воздействия подвижного состава на подходные насыпи и земляное полотно.

Выявление и анализ условий, при которых динамические деформации и перемещения в системе «мост-поезд» имеют наиболее неблагоприятный в эксплуатации характер, профессор Н. Г. Бондарь считал первостепенной задачей, подлежащей изучению в рамках проблемы взаимодействия мостов и подвижного состава [7].

Так как нагрузка от подвижного состава сосредоточена в местах расположения осей тележек, прогибы пролетного строения в каждый момент времени будут соответствовать изгибным деформациям и всегда можно найти два ее положения, дающие наибольший и наименьший статический прогибы пролетного строения.

От измеренных значений изгибных деформаций, зная класс бетона и расчетный модуль упругости материала конструкции, согласно закону Гука можно осуществить переход к фактическим напряжениям в конструкции моста.



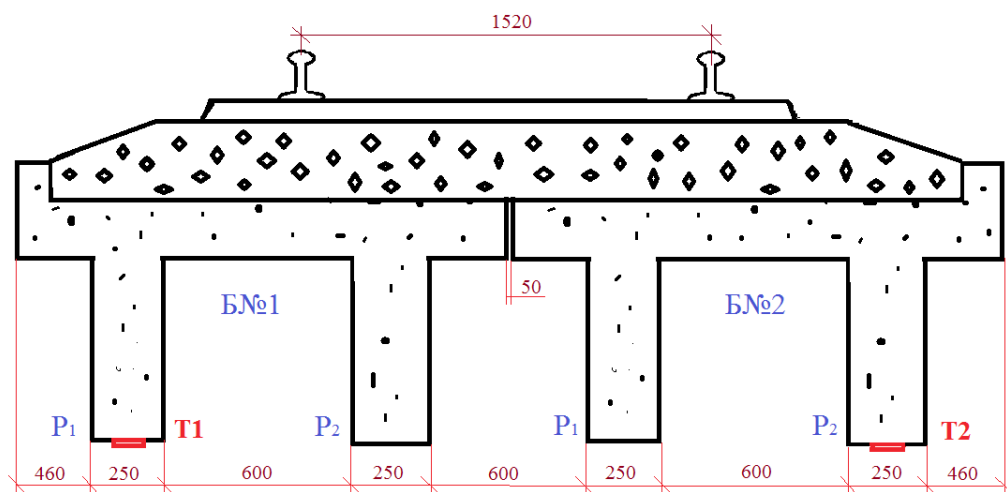


Рис. 1. Поперечное сечение пролетного строения со схемой расположения измерительных приборов: Б № 1 и Б № 2 – ребристые балки пролетного строения моста; P_1 и P_2 – ребра балки; T_1 , T_2 – тензорезисторы.

В качестве иллюстрации возможностей мобильного комплекса для тензометрии ниже приведены некоторые результаты измерений относительных изгибных деформаций железобетонного пролётного строения железнодорожного моста, расположенного на 118 км ПК-6 линии Астана–Павлодар, при проходе поезда, состоящего из подвижных единиц различных типов (так называемой «сборки»). Состав проходил с уменьшением скорости движения от 70 км/ч при входе на мост до 61 км/ч при выходе с моста и состоял из груженных и порожних вагонов, полувагонов, цистерн, платформ, бункеров в количестве 74 единиц. Тяговой силой являлись электровозы ВЛ-80^с и КЗ-8А.

Пролётное строение состоит из двух ребристых плит длиной 6 м. На рис. 1 при-

ведено поперечное сечение строения с указанием мест установки тензорезисторов на элементах конструкции.

С целью дальнейшего определения изменения напряженно-деформированного состояния конструкции от воздействия климатических факторов (попеременного замораживания и оттаивания) и эксплуатируемого на данном участке подвижного состава произведена защита установленных на конструкции тензометрических датчиков FLM-60–11 от внешних воздействий окружающей среды (рис. 2).

Периодическое проведение измерений деформаций конструкции пролётного строения в течение 2–3 лет позволит произвести прогноз изменения его состояния во времени и определить остаточный ре-

а)



б)



Рис. 2. Тензорезисторы FLM-60–11 с защитным покрытием от климатических воздействий на нижних гранях ребер плит.



Рис. 3. Общий вид мобильного комплекса для тензометрических измерений: 1 – измерительные модули; 2 – аккумуляторная батарея; 3 – синусный инвертор; 4 – полупромышленный компьютер.

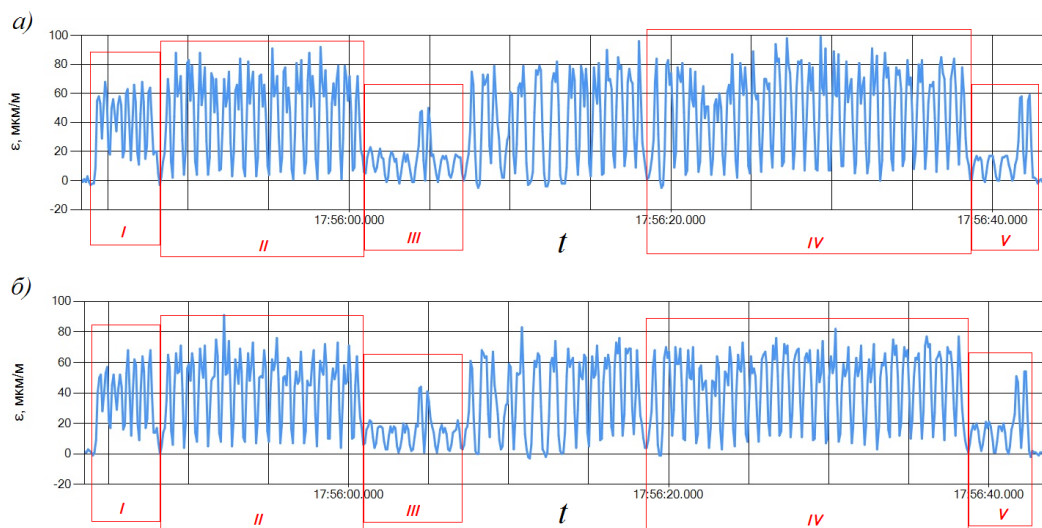


Рис. 4. Диаграмма изгибных деформаций при проходе сборного грузового состава (2-секционный электровоз ВЛ-80с + КЗ-8А, полувагоны, цистерны, платформы и т.д.): а – на первом ребре балки № 1; б – на втором ребре балки № 2.

сурс по несущей способности и грузоподъемности.

На рис. 3 показан общий вид мобильного комплекса для тензометрических измерений, установленного на объекте.

На рис. 4 представлена полная запись диаграммы изгибных деформаций растянутой зоны в средней части пролета при проходе «сборки», а на рис. 5–9 выделенные римскими цифрами на рис. 4 фрагменты этой записи, более подробно и наглядно иллюстрирующие характер деформаций при воздействии подвижных единиц различных типов.

Из рис. 4 следует, что деформации от воздействия груженых полувагонов (фрагмент IV) в 1,5–1,6 раза превышают деформации от воздействия локомотивов (фрагмент I). Данное обстоятельство объясняется прежде всего различием баз тележек и осевых нагрузок локомотивов и вагонов и, как следствие, различным характером их влияния на конструкцию. База тележки четырехосных полувагонов составляет 1,85 м, а база тележек электровозов КЗ-8А и ВЛ-80с – 2,6 м и 3,0 м соответственно.

На рис. 5 (фрагмент I на рис. 4) проход 2-секционных электровозов ВЛ-80с



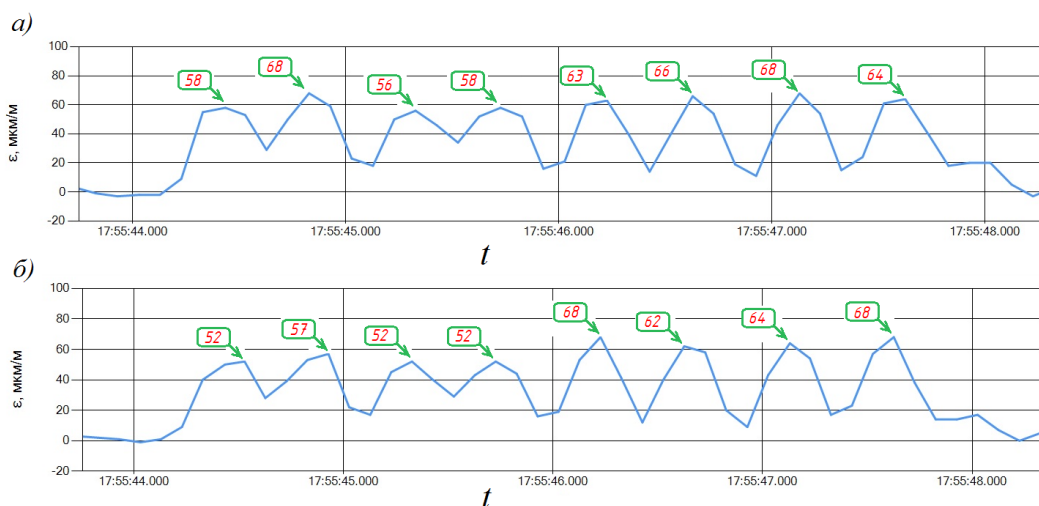


Рис. 5. Диаграмма изгибных деформаций при проходе сборного грузового состава (фрагмент I – 2-секционный электровоз ВЛ-80^с + КЗ-8А): а – на первом ребре балки № 1; б – на втором ребре балки № 2.

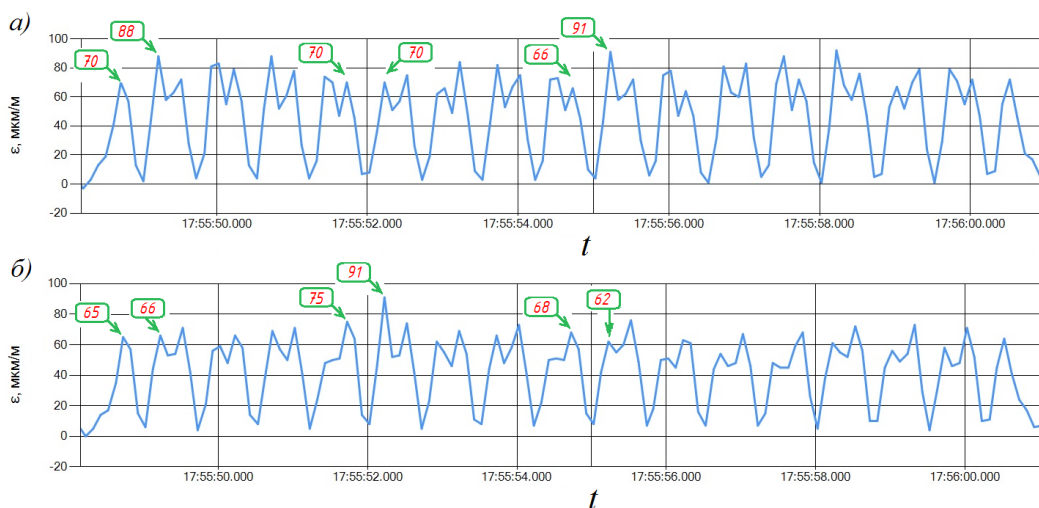


Рис. 6. Диаграмма изгибных деформаций при проходе сборного грузового состава (фрагмент II – груженные полувагоны и бункера): а – на первом ребре балки № 1; б – на втором ребре балки № 2.

и КЗ-8А по пролетному строению показан более детально с приведением количественных величин деформаций. Из приведенной диаграммы видно, что разница между деформациями, вызванными силовым воздействием локомотивов, достигает 16–20 %, при разнице между нагрузками на ось локомотивов КЗ-8А (25 тс) и ВЛ-80^с (24 тс) всего лишь в 4 %.

Данное обстоятельство также объясняется различием расстояний между осями колесных пар (базы) двухосной тележки и расположением нагрузки на пролетном строении – для тележки электровоза КЗ-8А это расстояние, как уже сказано, равно 2,6 м, а для тележки ВЛ-80^с – 3,0 м.

Причем наибольшие деформации наблюдаются при расположении над измеряемым сечением пролетного строения средней части двухосной тележки электровозов (осевая нагрузка расположена симметрично относительно средней части пролета), а наименьшие – при расположении средних частей их секций (середины базы) и сцепки между ними. Так как база секции электровоза ВЛ-80^с (7,5 м) меньше базы секции КЗ-8А (8,5 м), количественные величины наименьших деформаций при расположении его середин секций над сечением превышают наименьшие деформации при расположении над сечением середин секций КЗ-8А.

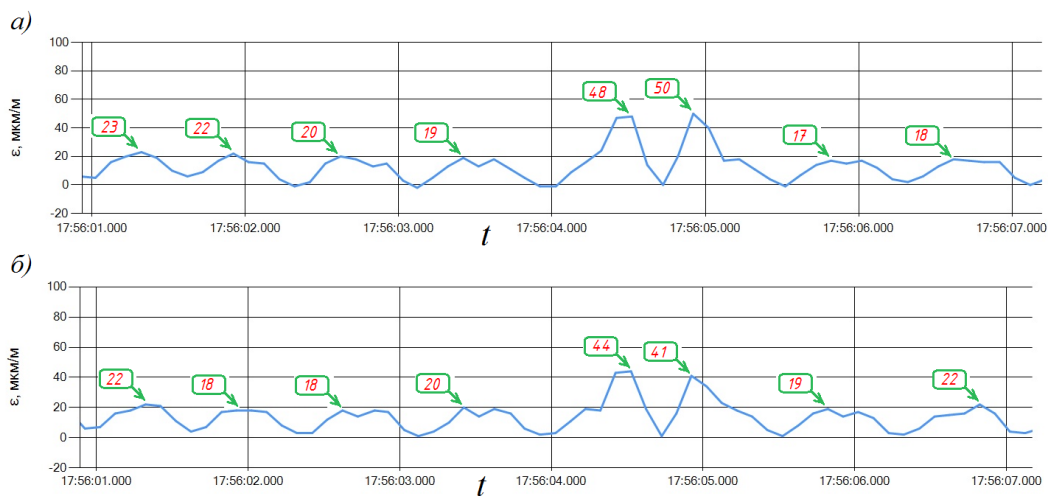


Рис. 7. Диаграмма изгибных деформаций при проходе сборного грузового состава (фрагмент III – платформы и полувагон): а – на первом ребре балки № 1; б – на втором ребре балки № 2.

На рис. 6 (фрагмент II на рис. 4) более подробно показан проход груженых полувагонов и бункеров, расположенных в голове состава. Совершенно четко можно определить как количество подвижных единиц (в данном случае 14 полувагонов и 2 бункера), так и деформации пролётно-го строения, вызванные воздействием каждой отдельной тележки. Видно, что изгибные деформации качественно и количественно отличаются от деформаций при проходе локомотивов и имеют несколько иной характер.

Во-первых, наименьшие деформации при расположении над сечением средней части полувагонов по величине значительно меньше аналогичных воздействий от локомотивов, так как база полувагона равна 8,65 м и здесь наибольшее влияние оказывает фактор скорости движения состава.

Во-вторых (и это наглядно демонстрируют показанные на диаграмме количественные параметры наибольших деформаций от воздействия тележек 1-го, 5-го и 9-го полувагонов), различно как воздействие тележек этих полувагонов на расположенные симметрично относительно оси моста ребра П-образных ребристых плит в поперечном сечении моста, так и передней и задней тележек каждого полувагона в отдельности.

Здесь, кроме изменения ускорения при движении состава, может оказывать влияние смещение центра масс, вызываемое

колебаниями наддрессорной части экипажа поперек («виляние» и «боковая качка») и вдоль («галомирование») оси моста, а также неравномерная загрузка полувагонов и бункеров.

Из рис. 7 (фрагмент III на рис. 4) видно, что порожние платформы вызывают относительно небольшие (в 3–4 раза меньше, чем груженые полувагоны) деформации пролётно-го строения, а полувагон загружен на 60–70 %. Наименьшие деформации достигают нулевых значений, то есть происходит процесс циклического нагружения и полной разгрузки конструкции. Следует отметить, что деформации от тележек полувагона различны в продольном и поперечном направлениях.

Диаграмма, представленная на рис. 8 (фрагмент IV на рис. 4), имеет еще более сложный характер, так как представляет собой запись воздействия подвижных единиц различных типов.

На рис. 9 (фрагмент V на рис. 4) показан процесс деформирования пролётно-го строения при выходе состава. Видно, что наименьшие деформации не являются мгновенными, то есть имеет место полная разгрузка конструкции в течение определенного периода времени.

База платформы (8,72 м) незначительно превышает базу полувагона (8,65 м), и здесь, помимо жесткости конструкции, прослеживается влияние факторов скорости и нагрузки на ось во временном аспекте процесса взаимодействия моста с под-



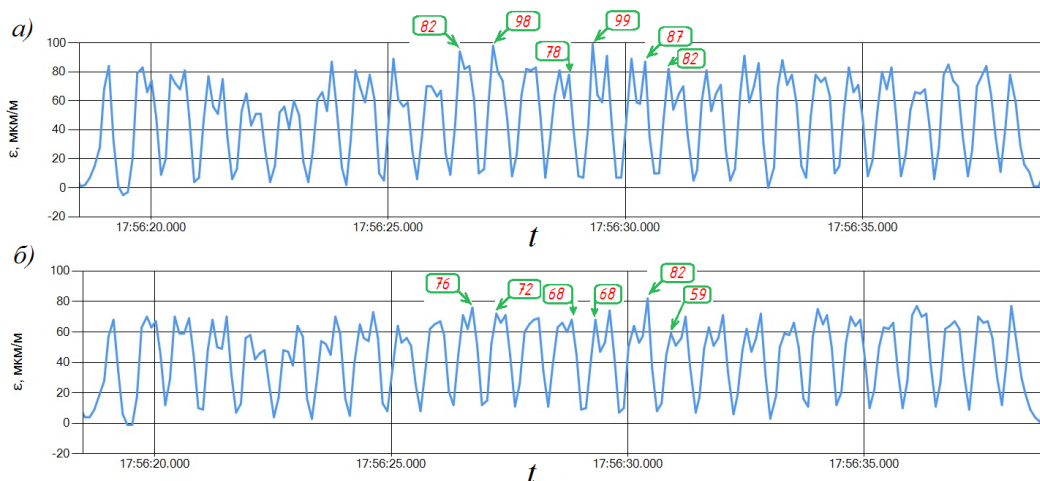


Рис. 8. Диаграмма изгибных деформаций при проходе сборного грузового состава (фрагмент IV – груженные полувагоны, вагоны, бункера, цистерны в середине состава): а – на первом ребре балки № 1; б – на втором ребре балки № 2.

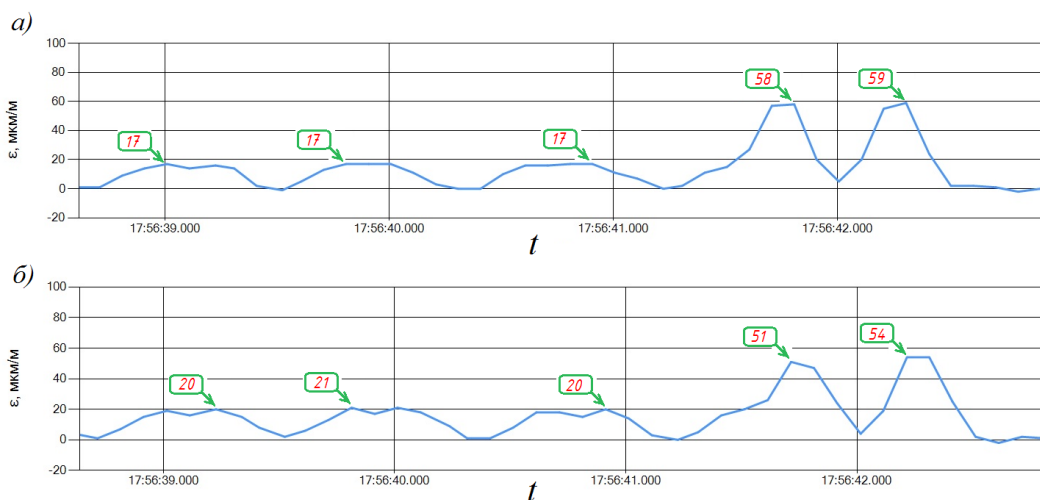


Рис. 9. Диаграмма изгибных деформаций при проходе сборного грузового состава (фрагмент V – порожние платформы и груженный полувагон): а – на первом ребре балки № 1; б – на втором ребре балки № 2.

вижным составом (для сравнения см. рис. 7 – фрагмент III на рис. 4).

Расчетные значения таких контролируемых параметров, как напряжения в главных балках в середине пролета, могут быть определены и инженерными методами, и с помощью специализированных расчетных программных комплексов, реализующих методы конечных элементов (MIDAS Civil, APM Civil Engineering, Модуль APM Structure3D, Cosmos M). Преимущество применения конечно-элементных моделей состоит в возможности моделировать различные неисправности в конструкции, адаптируя результаты расчета к реальным условиям эксплуатации. По отклонению

фактических напряжений от расчетных значений можно судить о степени поврежденности конструкций пролетного строения моста.

Периодическое проведение измерений деформаций конструкции пролетного строения в течение 2–3 лет позволит произвести прогноз изменения его состояния во времени и определить остаточный ресурс по несущей способности и грузоподъемности.

Нормами проектирования [6, п. 1.48*] регламентируются периоды (частоты) собственных колебаний для балочных разрезных металлических и сталежелезобетонных пролетных строений железнодорожных

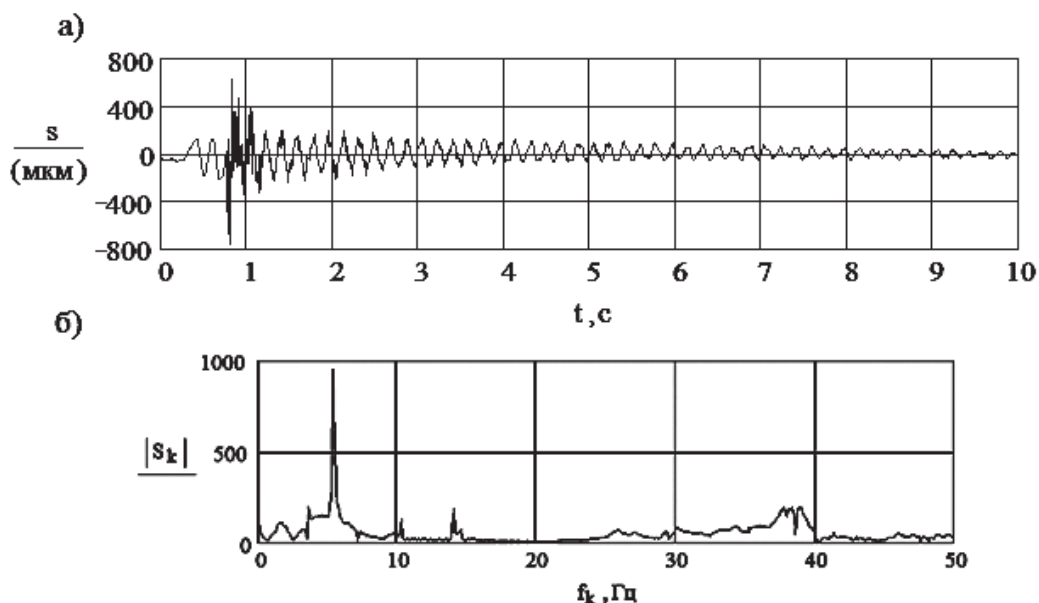


Рис. 10. Осциллограмма и ее спектр от прыжка человека (максимальный спектральный выброс на частоте 5,47 Гц).

мостов, а также пешеходных и городских мостов на стадиях расчета и монтажа.

Собственные частоты колебаний пролетного строения, регистрируемые под проходящей нагрузкой, будут существенно отличаться от расчетных частот из-за наличия в этот момент на конструкции значительной переменной массы подвижного состава. Учитывая, что погонная масса металлических пролетных строений старых норм проектирования лежит в пределах 0,5–1,0 тс/м, а распределенная нагрузка от обращающегося в настоящее время подвижного состава может превышать 10 тс/м, зафиксировать истинные собственные частоты колебаний конструкций под движущимся поездом не представляется возможным. Поэтому собственные частоты колебаний конструкций определяются либо по «хвостам» опытных виброграмм (осциллограмм) после ухода нагрузки с пролетного строения, либо при проведении экспресс-диагностики. Для возбуждения процесса колебаний конструкции прикладывается импульсное воздействие сосредоточенного груза малой массы в середине пролетного строения (метод малых импульсных воздействий – «прыжок человека»).

В качестве примера на рис. 10 приведены амплитудно-временная (а) и ампли-

тудно-частотная (б) зависимости колебаний балочного металлического пролетного строения железнодорожного моста через р. Сарыбулак железнодорожной линии Айнабулак–Алматы пролётом 27 м, полученные при воздействии от прыжка человека весом 80–90 кг.

Методы определения собственных частот колебаний балочных пролетных строений по «хвостам» опытных виброграмм и малым импульсным воздействиям апробированы и широко применяются, к примеру, в практике диагностики автодорожных и железнодорожных мостов специалистами ОАО ЦНИИС [8], МАДИ [9] и СГУПС [10].

Виброграммы собственных колебаний записывают с помощью специальных высокочувствительных сейсмометров, входящих в состав измерительно-вычислительного комплекса для динамических испытаний конструкций, устанавливаемых в середине пролета на верхнем (или нижнем) поясе одной из металлических балок. Уменьшение собственных частот колебаний может служить показателем технического состояния конструкции.

Результаты измерений, выполненных с применением комплексов, могут визуализироваться в виде графиков изменения деформаций и напряжений (в случае из-





вестного фактического модуля упругости материала), диаграмм прогибов, амплитудно-временных и амплитудно-частотных зависимостей перемещений, скоростей и ускорений колебательного процесса. Полученные характеристики могут служить исходными данными, повышающими точность расчета при разработке модели сооружения и формировании алгоритмов задач выявления повреждений.

Некоторые результаты натурных экспериментальных научных исследований сотрудников лаборатории опубликованы в изданиях, включенных в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), и сборниках материалов международных научно-практических конференций (в работе которых сотрудники лаборатории принимали участие и выступали с докладами), изданных в Республике Казахстан и за рубежом [11–16].

ВЫВОДЫ

Для наиболее эффективной оценки надёжности конструкций мостов и установления соответствия между расчетной схемой и действительной работой сооружений необходимо осуществлять периодический мониторинг напряженно-деформированного состояния сооружений под эксплуатационными нагрузками.

Проведение периодического мониторинга и вибродиагностики в перспективе позволит:

1. Обеспечить безопасность инфраструктуры железнодорожного транспорта в соответствии с требованиями технических регламентов Таможенного союза ТР ТС 001/2011, 002/2011 и 003/2011.

2. Обосновывать возможность увеличения скорости движения подвижного состава и нагрузки до 27 т/ось на наиболее загруженных линиях.

3. Увеличить сроки эксплуатации и уменьшить затраты по текущему содержанию пути и искусственных сооружений.

4. Принимать наиболее оптимальные конструктивные решения при проектировании и реконструкции пути и искусственных сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по определению грузоподъёмности металлических пролётных строений железнодорожных мостов. — М.: Транспорт, 1987.
2. Руководство по определению грузоподъёмности железобетонных пролётных строений железнодорожных мостов. — М.: Транспорт, 1989.
3. Руководство по определению грузоподъёмности опор железнодорожных мостов. — М.: Транспорт, 1995.
4. Руководство по пропуску подвижного состава по железнодорожным мостам. — М.: Транспорт, 1993.
5. СНиП 3.06.07–86 Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний/Гострой СССР. — М.: Транспорт, 1987.
6. СНиП 2.05.03–84* Мосты и трубы/Гострой СССР. — М.: Транспорт, 1991.
7. Бондарь Н. Г., Козьмин Ю. Г., Ройтбурд З. Г. и др. Взаимодействие железнодорожных мостов с подвижным составом. — М.: Транспорт, 1984. — 272 с.
8. Сергеев А. А. Методика экспериментальной оценки динамических воздействий подвижной нагрузки на пролётные строения автодорожных мостов / Дис... канд. техн. наук. — М.: ЦНИИС, 2007. — 197 с.
9. Хазанов М. Л. Анализ напряженно-деформированного состояния мостовых конструкций с использованием компьютерной измерительной системы / Дис... канд. техн. наук. — М.: МАДИ, 2007. — 128 с.
10. Цветков Д. Н. Оценка технического состояния сталежелезобетонных пролётных строений железнодорожных мостов по динамическим параметрам / Дис... канд. техн. наук. — Новосибирск: СГУПС, 2010. — 121 с.
11. Курбацкий Е. Н., Бондарь И. С., Квашнин М. Я. Исследование отклика балочных мостов на воздействие поезда // Мир транспорта. — 2015. — № 3. — С. 58–71.
12. Куанышев Б. М., Квашнин М. Я. Оценка эффективности усиления конструкций железнодорожных мостов композитным материалом // Вестник КГУСТА. — 2016. — № 1. — С. 238–244.
13. Бондарь И. С., Буромбаев С. А., Квашнин М. Я. Динамическая работа пути на земляном полотне и пролётном строении моста при проходе тяжёловесных локомотивов // Путь и путевое хозяйство. — 2016. — № 1. — С. 29–32.
14. Квашнин М. Я., Бондарь И. С., Жангабылова А. М. Мониторинг воздействия подвижного состава на балочные пролётные строения железнодорожных мостов // Материалы Международной научно-практ. конференции «Транспортная наука и инновации». — Алматы: КазАТК, 2015. — С. 275–279.
15. Квашнин М. Я., Буромбаев С. А., Бондарь И. С., Жангабылова А. М. Влияние вибродинамического воздействия локомотивов с высокими осевыми нагрузками на железнодорожный путь и балочные железобетонные пролётные строения мостов // Труды XII международной научно-техн. конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». — М.: МИИТ, 2015. — С. 163–166.
16. Квашнин М. Я., Бондарь И. С., Рыстыгулов П. А., Кыстаубаев С. Б. Экспериментальные исследования конструкций железнодорожных мостов, усиливаемых композитным материалом // Труды 16-й научно-практ. конференции «Безопасность движения поездов». — М.: МИИТ, 2015. — Т. II. — С. II-43–II-47. ●

Координаты автора: **Бондарь И. С.** – ivan_sergeevich_08@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 07.10.2016, принята к публикации 28.12.2016.